干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

多模式预测气候变化及其对雪冰流域径流的影响

冉思红[1,2]，王晓蕾[2,3]，罗 毅[2,3]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学,北京 100049；3. 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100049)

摘 要: 冰川覆盖流域的雪冰融水对河川径流有重要的调节作用。气候变化影响雪冰融水过程和数量变化,河川径流过程和径流量相应变化,其程度与流域冰川情况相关。通过利用CMIP5气候模式输出气象数据驱动流域水文模型,模拟研究天山地区3个不同冰川覆盖率河流(库玛拉克河、玛纳斯河、库车河)的径流对气候变化的响应。结果表明:随着未来气温和降水的持续增加,3个流域的雪融水均有增加,冰融水变化受冰川覆盖面积的影响,在各个流域变化不一致。径流变化主要受降水增加和雪冰融水变化的综合影响,在未来情景下各流域径流均有增加,分别增加了5.8%~14.3%(库车河)、2.9%~11.4%(玛纳斯河)、12.9%~47.1%(库玛拉克河),且冰川覆盖率越大的流域,预估径流不确定性变化区间受冰融水影响越大。预估3个流域的径流、雪冰融水年内分布变化表明,各河流的春季融雪时间提前和融雪量增加使得流域春季径流量较历史时期增大;在夏季,受雪冰融水变化的影响库车河、玛纳斯河夏季径流峰值量减小,而库玛拉克河径流峰值量增加,且预估的各流域夏季径流变化不确定性区间明显大于其它季节。

关 键 词: 气候变化；气候模式；水文模型；冰川；径流

文章编号:

IPCC第五次气候评估报告(AR5)指出,近20 a来全球山地冰川整体处于退缩状态,北半球的积雪面积持续缩小[1-2],且有冰川覆盖的流域其径流对气候变化响应更为敏感[3]。天山广泛分布冰川,是众多流入中国新疆和中亚五国河流的发源地[4-6],是下游地区的人类生存和发展的主要水源[7]。一些研究者[8-11]分析了天山观测冰川、各水系或流域冰川过去几十年间的变化,表明受气候变暖影响天山不同区域已发生不同程度的退缩。冰川融水虽然可以在短期内提供丰富的水量,但是其总储量在减少,如果冰川消融继续加速,未来以融冰和融雪为主要补给的流域可能会出现严重的水资源危机[12-13]。随着气候持续变化,越来越多的学者利用不同方式模拟的未来气候情景数据驱动水文模型模拟预估径流变化[14-15]。

具有冰川模块的水文模型是研究雪冰流域水文过程变化特征的一种有效工具,通过模型模拟可以很好的表现出冰川消退与流域产流的关系[16],其中气候模式输出的气候变化情景数据驱动水文模型是预估未来气候变化对水文过程影响的常用方法[17-18]。近年来已有较多研究利用CMIP5(Coupled model intercomparison project phase 5)气候模式数据驱动水文模型模拟预估中亚天山、喀喇昆仑山、青藏高原、喜马拉雅山上的一些雪冰流域未来几十年径流变化趋势、积雪融水变化及冰川面积变化[19-23]。Bosshard等[24]和Vetter等[25]分别采用5个和10个气候模式预估Rhine流域未来径流变化,得到了相同的径流变化趋势但变化幅度存在差异。Zhang等[20]

收稿日期: 2020-10-10；**修订日期:** 2021-04-20

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20060301);国家重点研发计划(2016YFC0501603);国家自然科学基金资助项目(41741025)

作者简介: 冉思红(1993-),女,硕士研究生,主要从事流域水文模拟. E-mail:18810990976@163.com

通讯作者: 罗毅(1966-),男,博士,研究员,主要从事农业水文、森林水文、高寒山区水文、生态系统与水文系统相互作用的理论方法研究. E-mail:luoyi@igsnrr.ac.cn

选取了5个气候模式驱动水文模型模拟预估了乌鲁木齐河未来几十年径流的变化，结果显示冰川融水在未来会呈先增加后减小的趋势，气候模式输入的气象数据对径流模拟影响较大。CMIP5发布了50多个气候模式，且选取气候模式越多，预估径流变化的不确定性区间越大[26]。本文采用CMIP5中能够获得的39个气候模式，这些气候模式模拟的气温和降水输入水文模型可以给出流域水文过程模拟预估结果的变化范围。

在雪冰流域，积雪和冰川作为降水最终转化为径流过程中的一种中间状态，对降水、气温变化的响应敏感[3,27]。一些研究结果表明，过去几十年间天山各地区径流变化的主要影响因素是不同的[28-30]。例如，高前兆等[31]对比了阿克苏河和开都-孔雀河气温、降水和径流的关系，结果表明开都河的径流变化幅度要大于阿克苏河，并指出以冰川融水补给为主的河流比以降水补给为主的更加稳定。未来几十年，不同冰川覆盖率的流域对气候变化的响应又是如何呢？基于以上问题，利用39个气候模式驱动具有模拟冰川水文过程能力的水文模型SWAT-RSG[32]，探讨天山地区冰川覆盖率不同的3个流域其径流对气候变化的响应，同时也可以为该地区合理优化水资源配置提供相应的理论依据。

1 研究区、数据与方法

1.1 研究区概况

天山山脉（39°~45°N，69°~95°E）东西横跨中国新疆、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦4国，整个天山可被划分为中天山、西天山、东天山和北天山[10,33]。本文选取天山地区冰川覆盖率不同的库玛拉克河、玛纳斯河和库车河的产流区作为代表性流域，研究气候变化对雪冰水文过程、径流过程的影响；流域位置和冰川覆盖情况见图1，特征见表1。库玛拉克河流域冰川面积覆盖率最大为21.0%，径流主要由雪冰融水补给为主。玛纳斯河流域冰川面积覆盖率约为10.0%，径流主要由夏季降雨和雪冰融水补给为主。库车河冰川面积最小，冰川覆盖率仅有0.5%，其径流补给主要来源于夏季降雨。

1.2 数据

SWAT-RSG模型构建所需要的基础数据包括：流域数字高程模型（DEM）、土壤、土地覆盖、冰川、气象和径流数据等。

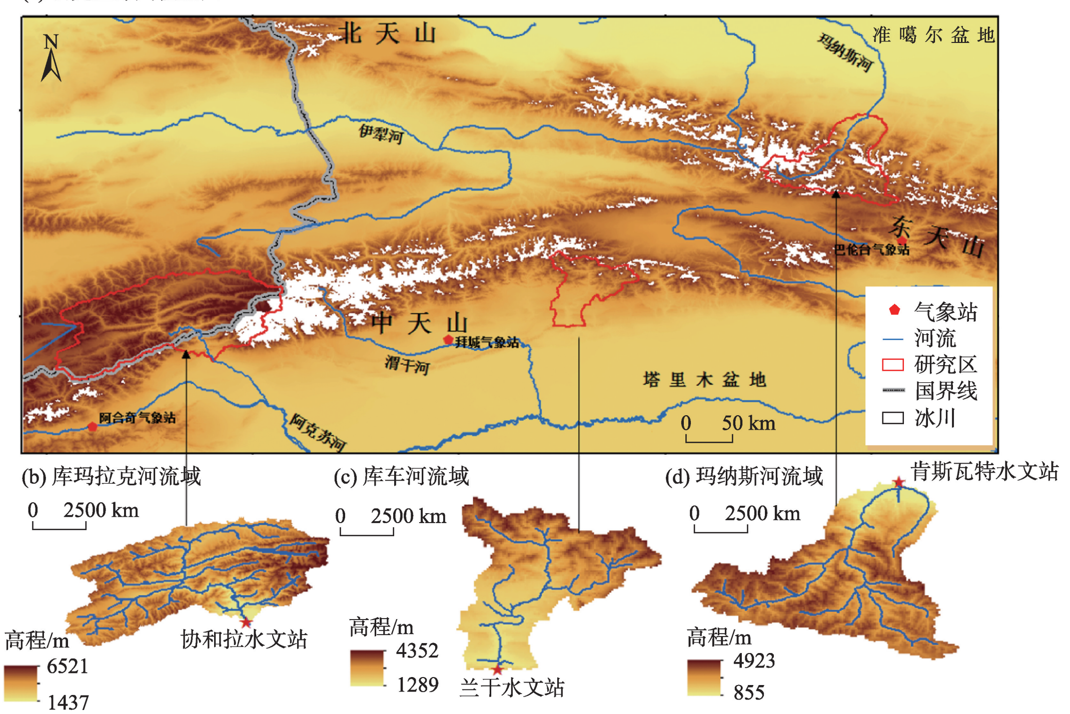


图1 库玛拉克河、玛纳斯河和库车河流域位置及冰川覆盖示意图

Fig. 1 Location of Kumaric River Basin, Manas River Basin, Kuqa River Basin and the distribution of glacier

表1 研究区流域面积、冰川面积、高程和气候特征统计

Tab. 1 Statistics of basin area, glacier area, elevation, and climatic features in study area

河流	水文站	流域面积/km²	冰川情况		高程/m			气候特征	
			面积/km²	覆盖率/%	平均	最低	最高	气温/°C	降水/mm
库玛拉克河	协和拉	12990	2725	21.0	3732	1434	7070	10.8	130.0
玛纳斯河	肯斯瓦特	5163	493	9.5	3252	846	5145	7.2	215.0
库车河	兰干	2912	15	0.5	2575	1271	4488	11.4	66.5

注：冰川面积统计来自于中国第二次冰川编目数据集，时间2007s[34]和AsiaCryoWeb发布的Tien Shan Glaciers V1(TSGV1)，时间2002s[35]。

DEM数据采用ASTER GDEM（ASTER global digital elevation model，http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/index.jsp），分辨率为90 m。在ArcSWAT中利用DEM数据生成子流域边界、河道、高程带和坡度等。土壤数据从HWSD（Harmonized world soil database）数据库提取。提取数据包括土壤名称、分层数、质地、容重等。而土壤有效水含量、饱和水力传导度等则需要通过SPAW（Soil plant atmosphere water）软件进行处理计算。根据以上方法得出的土壤参数写入到SWAT模型中的用户土壤数据库中。土地利用图采用欧洲航天局2009年新版世界卫星地图GlobCover2009，空间分辨率为300 m。

冰川数据主要来源于中国第一次冰川编目数据集（http://westdc.westgis.ac.cn），第二次冰川编目数据集[34]。库玛拉克河流域产流区大部分位于吉尔吉斯斯坦，冰川数据采用AsiaCryoWeb发布的TSGV1（Tien Shan Glaciers V1.0）[35]数据集。冰川信息包括地理坐标、面积、长度、延伸方向、始末端高程和平均高程以及冰川类型和冰碛类型，冰川矢量边界数据。以上冰川信息作为GHRU方法建模的输入数据。径流数据来源于《中国水文年鉴》统计的月值数据，玛纳斯河的肯斯瓦特水文站为1961—2005年；库车河的兰干水文站为1961—1990年；库玛拉克河的协和拉水文站为1961—2005年。

3个流域的气象观测数据情况。由于气象观测站通常位于海拔较低的位置，同时流域内气象观测站点稀少，高海拔地区缺乏观测数据，研究中进一步采用网格气象数据APHRODITE（Asian precipitation highly-resolved observational data integration towards evaluation of water resources）[36]的降水数据和PGMFD（Princeton's global meteorological forcing dataset）[37]的气温数据。这2个数据集已在中亚天山、喀喇昆仑山、青藏高原等缺乏长期观测气候资料的高海拔地区得到很好的应用[21,38-40]。

1.3 水文模型

SWAT-RSG模型适用于模拟冰川、流域、区域多尺度上的气候变化对雪冰水文过程和径流的影响，在天山、帕米尔、喀喇昆仑山等雪冰流域的应用中取得了较好效果[20,41-42]，本文将利用该水文模型模拟研究区流域水文过程。该模型是Luo等[32]将冰川水文响应单元（Glacier hydrologic response units，GHRUs）融入到SWAT模型[43]中，使其具备流域尺度融雪、融冰和降雨产流过程的模拟能力，进而对雪冰流域径流模拟。GHRUs方法，计算单条冰川物质平衡，并用冰川体积-面积尺度关系（Volume-area scaling relation）模拟冰川动态变化；冰川物质平衡计算中，积累考虑了雪转冰、融水再冻结，消融考虑了升华、冰上雪融水、冰融水；雪、冰融水采用度日因子算法；冰川径流由冰上雪融水、冰融水、冰上雨产流3部分构成；每个GHRU划分高程带，以适应降水、气温随高程的变化。方法的详细论述见文献Luo等[32]。

1.4 模型模拟效果评价指标

模型率定和验证阶段，模拟的径流量和实测值的比较采用NSE（Nash-sutcliffe efficiency）[44]和PBIAS（Percent bias）[45]2个指标评价。NSE主要评价模拟的径流过程和实测值的吻合情况；PBIAS主要评价模拟和实测径流量的数量偏差。采用Moriasi等[45]给出划分模型参数化优劣的标准进行评价，见表2。NSE和PBIAS计算方法如下：

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{k} (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{k} (Q_i^{obs} - Q_i^{mean})^2} \right] \quad (1)$$

$$PBIAS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{k} (Q_i^{obs} - Q_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^{k} Q_i^{obs}} \right] \quad (2)$$

式中：Q_i^{obs} 为第i次的观测径流量；Q_i^{sim} 为第i次的模

表2 NSE和PBIAS对径流模拟能力评价

Tab. 2 Evaluation of simulated streamflow by nash-sutcliffe efficiency (NSE) and percent bias (PBIAS)

NSE	PBIAS/%	结果评价
NSE≤0.50	PBIAS>±25	不满意
0.50<NSE≤0.65	±15<PBIAS≤±25	满意
0.65<NSE≤0.75	±10<PBIAS≤±15	好
0.75<NSE≤1	PBIAS<±10	非常好

拟径流量；Q^{mean} 为观测径流量的均值；k 为径流序列样本数。

1.5 气候模式选取与统计降尺度

全球气候模式是研究气候变化机制和预估未来气候变化对水文过程影响的重要工具[46]。CMIP5给出了20多个模式研究中心发布的50多个气候模式在RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5共4个典型浓度路径情景(Representative concentration pathways, RCPs)下的气候变化预测结果。这些输出结果中包括气温和降水等气象数据，时间跨度为1850s—2100年，时间分辨率有年、月、日3类。RCP6.0和RCP4.5比较相近，且相当多的气候模式没有给出RCP6.0情景的结果，因此本文不考虑RCP6.0情景，只选取RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5共3个典型浓度路径情景，下载相应情景月气温和降水数据，共计39个(表3)。

统计降尺度方法是将气候模式输出的气象数据转换为流域尺度气象数据的主要方法之一[47]。本文使用Delta统计降尺度方法[48]将所选取的各模式降水气温数据从模式格网降尺度到每个基站。该方法是直接建立模式模拟结果与地面气候变量之间关系，相对简单，并且随着GCM模式结果的时空分辨率的增加，其可靠性增加。

2 结果与分析

2.1 模型参数的率定和验证

2.1.1 径流 表4为3条河流模型率定期和验证期的径流评价结果。率定期，3条河流的多年平均径流模拟值和实测值相差较小，均在2%左右。验证期，3条河流的多年平均径流模拟值和实测值相差2%~5%左右。根据Moriasi等[45]模拟评价指标，结果表明在率定期和验证期除了库车河的NSE和PBIAS以外其余均达到了"好"的标准。虽然库车河在率定期和验证期的NSE均为0.63，PBIAS分别为6.65和-2.08，达到模拟效果分级评价中"满意"的标准。

图2所示为模拟的3条河流的月径流与实测月径流变化。从3条河流的模拟结果看，该模型模拟的月径流过程线总体上可以反应出流域实测径流

表3 CMIP5中39个气候模式基本信息

Tab. 3 Brief overview of the 39 climate models in CMIP5

模式名称	所属国家	分辨率	情景
ACCESSE1-3	澳大利亚	1.25°×1.88°	RCP4.5、RCP8.5
ACCESSE1-0	澳大利亚	1.25°×1.88°	RCP4.5、RCP8.6
BCC-CSM1-1	中国	2.80°×2.80°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
BCC-CSM1-1-m	中国	1.12°×1.25°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
BNU-ESM-3	中国	2.80°×2.80°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
CanESM2	加拿大	2.80°×2.80°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
CCSM4_4	美国	0.94°×1.25°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
CESM1-BGC	美国	0.94°×1.25°	RCP4.5、RCP8.5
CESM1-CAM5	美国	0.94°×1.25°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
CESM1-WACCM	美国	1.90°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
CMCC-CESM	意大利	3.75°×3.75°	RCP8.5
CMCC-CM	意大利	0.75°×0.75°	RCP4.5、RCP8.5
CMCC-CMS	意大利	1.86°×1.875°	RCP4.5、RCP8.5
CNRMCM	法国	1.40°×1.40°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
CSIRO-Mk3-6-0	澳大利亚	1.88°×1.88°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
EC-EARTH	爱尔兰	1.12°×1.25°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
FGOALS-g2	中国	2.81°×2.81°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
FIO-ESM	中国	2.79°×2.81°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GFDL-CM3	美国	2.00°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GFDL-ESM2G	美国	2.00°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GFDL-ESM2M	美国	2.00°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GISS-E2-H	美国	2.00°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GISS-E2-H-cc	美国	2.00°×2.50°	RCP4.5
GISS-E2-R	美国	2.00°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GISS-E2-R-cc	美国	2.00°×2.50°	RCP4.5
HadGEM2-AO	韩国	1.25°×1.88°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
HadGEM2-CC	英国	1.25°×1.88°	RCP4.5、RCP8.5
HadGEM2-ES	英国	1.25°×1.88°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
INMCM4	俄国	1.50°×2.00°	RCP4.5、RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	法国	1.86°×3.75°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
IPSL-CM5A-MR	法国	1.25°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
IPSL-CM5B-LR	法国	1.9°×3.75°	RCP4.5、RCP8.5
MIROC5	日本	1.40°×1.40°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
MIROC-ESM	日本	2.81°×2.81°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
MIROC-ESM-CHEM	日本	2.81°×2.81°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
MPI-ESM-LR	德国	1.86°×1.88°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
MPI-ESM-MR	德国	1.86°×1.88°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
MRI-CGCM3	日本	1.12°×1.13°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
NorESM1-M	挪威	1.90°×2.50°	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5

表4 SWAT-RSG模型在库车河、玛纳斯河、库玛拉克河径流模拟评价

Tab. 4 Evaluation indices for assessing runoff simulation of the SWAT-RSG in Kuqa River, Manas River and Kumaric River

河流	水文站	月模拟				多年平均径流量/10^8 m^3			
		NSE		PBIAS		率定期		验证期	
		率定期	验证期	率定期	验证期	实测值	模拟值	实测值	模拟值
库玛拉克河	协和拉	0.66	0.85	1.55	4.08	45.50	44.80	47.30	50.00
玛纳斯河	肯斯瓦特	0.88	0.87	−0.65	−4.45	12.36	12.04	11.43	12.05
库车河	兰干	0.63	0.63	6.65	−2.08	2.97	3.03	3.59	3.50

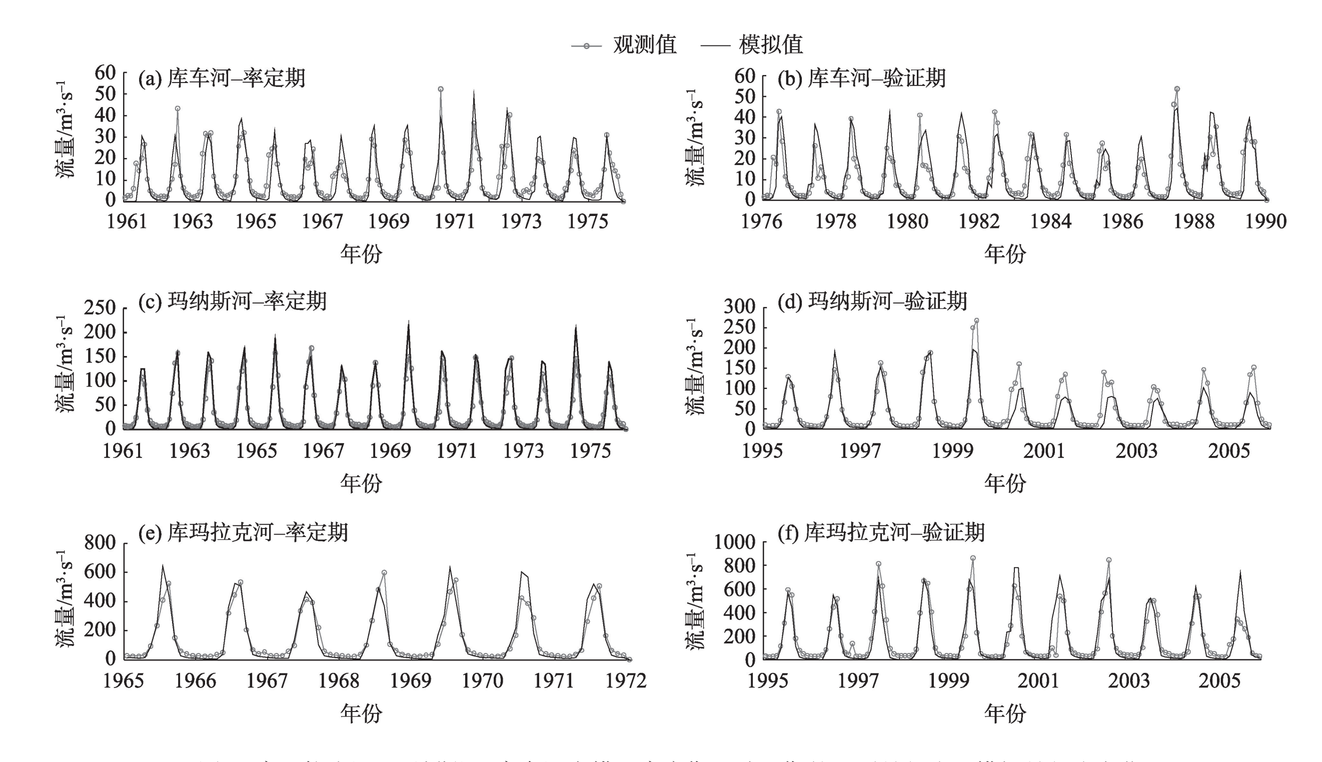


图2 库玛拉克河、玛纳斯河、库车河在模型率定期和验证期的观测月径流和模拟月径流变化

Fig. 2 Observed and simulated monthly stream flow of Kuqa River, Manas River, and Kumaric River in calibration and validation periods

的变化趋势。综上，本文所使用的SWAT-RSG模型能够较好的模拟出研究区径流的年际和年内变化。

2.1.2 冰川面积变化 模拟的库玛拉克河流域、玛纳斯河流域和库车河流域自1961年到2006年的冰川面积分别退缩了7.2%、19.8%和31.5%。2次冰川编目[34,49]及AsiaCryoWeb发布的TSGV1数据集[35]给出的冰川面积与模拟值相差较小，分别退缩5.3%、19.0%和35.5%。综上，SWAT-RSG模拟的3个流域冰川面积变化可以较好地反映各流域冰川面积的历史变化情况。

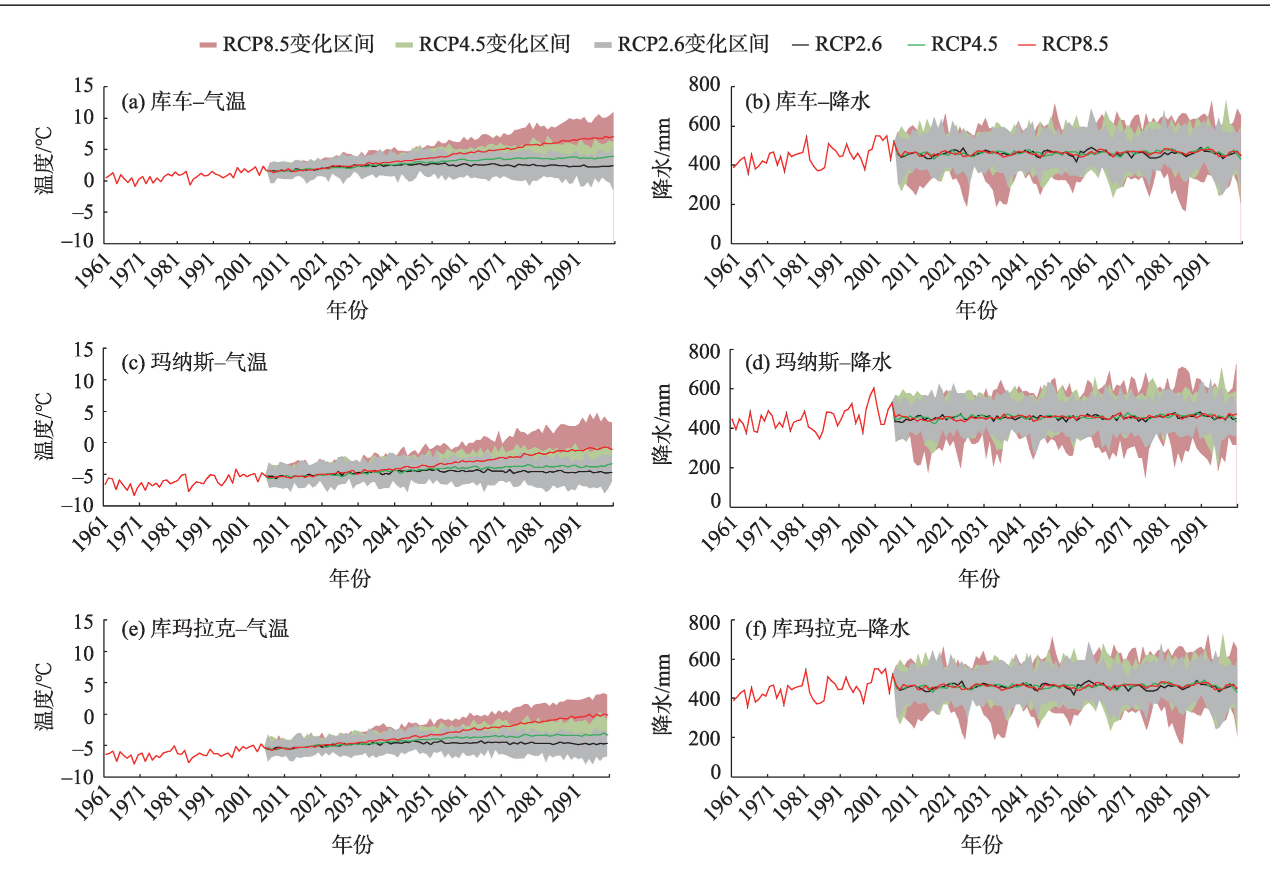
2.2 流域未来时期气温和降水变化

RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5 3种情景下，各流域未来39个气候模式集合平均气温均呈上升趋势，且随着排放情景的增强，气温上升幅度增大，见图3；分时期统计见表4。3种情景下本研究预估未来远期的气温变化范围分别为1.8~1.9 ℃、2.5~3.0 ℃、4.2~6.0 ℃，与张艳武等[50]利用CMIP5中29个气候模式预估的21世纪末期在3种情景下中国平均气温分别升高2.0 ℃、3.3 ℃、和6.3 ℃相比偏低，其主要原因在于研究选取流域位于有冰川覆盖的高海拔地区。

3种情景下，随着排放情景升高，预估的各流域降水年际变化并没有表现出太大差异(图3)，但分时期统计各流域未来时期降水较历史时期均有增加，增加幅度较小(表5)。从表5可以看出，降水变化在不同情景下及流域间有些许差异。

2.3 流域未来径流变化

2.3.1 年际变化 在RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下，未来时期3个流域的径流量较历史时期均有



注:实线为39个气候模式集合平均值;阴影部分为39个气候模式集合的最大值、最小值表示的不确定性区间。下同。

图3 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5情景下1961—2100年库车河、玛纳斯河、库玛拉克河气温和降水年际变化趋势

Fig. 3 Inter-annual change trends of temperature and precipitation in Kuqa River, Manas River, and Kumaric River during 1961—2100 under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

增加(图4、表5),这与Lutz等[38]预估的未来亚洲高海拔地区5个流域上游径流变化趋势一致。冰融水变化在不同时期、不同情景及流域间存在差异,库车河和库玛拉克河在未来远期RCP8.5情境下变化最大为-65.1%和208.2%;玛纳斯河则在未来远RCP2.6情境下变化最大,减少了37.9%(表5),受冰融水影响各流域未来2个时期的径流量较历史时期的变化也存在差异,对于冰川覆盖率较大,冰融水贡献大的库玛拉克河流域,总体上呈先增加后减少的趋势,这与一些研究学者[51-53]给出的冰川覆盖比例越高的流域,其未来径流可能增加得越多的结论一致。玛纳斯河流域的径流在3种情景下均呈先增加后减小的趋势,且径流的变化趋势与降水的增多趋势不一致。而对于冰川覆盖率极小,主要由降水补给为主的库车河流域,在3种情景下径流均有增加。综上,在冰川覆盖率小的库车河流域,径流与降水变化趋势一致,而在冰川覆盖率较大的玛纳斯河和库玛拉克河径流呈先增加后减少或持续增加趋势,与降水变化趋势不完全一致。

2.3.2 年内分布 在3种情景下,降水变化差异小,但在RCP8.5情景下气温升高幅度最大,引起的径流和雪冰融水变化也更为显著。因此,本文着重探讨在RCP8.5情景下不同冰川覆盖率的流域雪冰融水的季节变化,从而揭示径流季节变化的主要原因。

预估各流域未来春季径流量较历史时期均有增加,这种变化主要与春季融雪峰值时间提前、融雪量增大有关。夏季各河流的径流量峰值时间无明显偏移,但是径流峰值量在不同冰川覆盖率的流域发生不同程度的变化(图5)。冰川覆盖率最大的库玛拉克河夏季融雪量在未来2个时期均有减少,但是其最大径流量受到冰融水在夏季显著增加的影响,径流量较历史时期均有增加。值得注意的是该流域近期的最大径流量大于远期,与冰融水变化不一致,推测其原因在于该情景下气温增加明显导致该流域夏季蒸散加大。

表5 研究区未来近期和远期39个气候模式集合的气温、降水、径流、冰融水均值较历史时期变化

Tab. 5 Changes of temperature, precipitation, streamflow, and ice melt on averages of the 39 climate models for the two future periods relative to the historical period in the study area

情景	变量	库车河				玛纳斯河				库玛拉克河			
		气温/℃	降水/%	冰融水/%	径流/%	气温/℃	降水/%	冰融水/%	径流/%	气温/℃	降水/%	冰融水/%	径流/%
RCP2.6（近期）	平均值	1.7	4.7	−5.7	6.4	1.5	3.7	25.0	10.1	1.7	3.3	111.8	28.3
	最大值	2.9	23.6	31.2	51.6	2.9	18.1	161.5	41.8	2.6	15.5	212.6	56.2
	最小值	0.6	−10.4	−40.7	−25.7	0.0	−9.7	−43.0	−8.8	0.6	−10.5	4.6	8.2
	标准差	0.6	7.4	15.1	15.0	0.7	5.9	61.9	13.9	0.5	6.1	52.3	13.4
RCP2.6（远期）	平均值	1.8	3.9	−64.6	7.8	1.7	4.7	−37.9	2.9	1.9	3.8	40.5	12.9
	最大值	3.6	28.0	−49.1	72.8	3.1	24.9	12.1	32.8	3.5	17.2	111.5	35.9
	最小值	−0.3	−11.3	−77.1	−23.1	−0.2	−13.2	−51.6	−18.1	−0.2	−9.1	−25.0	−11.1
	标准差	0.8	9.4	7.3	20.5	0.9	7.1	13.6	10.7	0.8	7.0	33.5	11.4
RCP4.5（近期）	平均值	1.6	4.4	−2.1	7.4	1.4	3.8	23.5	9.8	1.7	3.2	121.1	30.5
	最大值	2.7	21.9	26.4	43.2	2.4	17.7	156.5	39.7	2.7	12.9	226.8	62.9
	最小值	−1.3	−9.5	−27.9	−21.2	−0.1	−13.7	−49.0	−7.2	−1.3	−12.0	10.8	6.5
	标准差	0.7	7.0	12.1	14.0	0.6	6.3	58.6	12.6	0.7	5.8	52.2	11.7
RCP4.5（远期）	平均值	3.0	6.3	−60.0	12.4	2.5	5.8	−22.0	6.6	3.0	4.4	103.4	27.0
	最大值	4.9	29.2	−33.3	73.8	4.8	25.4	13.9	40.8	4.9	18.1	154.2	48.0
	最小值	1.1	−12.8	−80.3	−26.8	−0.2	−13.0	−60.8	−12.9	1.1	−12.8	24.0	6.4
	标准差	0.9	8.6	11.4	19.4	1.1	7.6	20.4	11.8	0.9	7.4	31.8	10.1
RCP8.5（近期）	平均值	2.0	4.2	3.4	5.8	1.6	3.7	34.5	11.4	2.0	3.1	142.9	34.8
	最大值	3.1	27.8	33.5	60.3	3.1	21.6	178.3	46.0	3.0	18.3	251.4	67.9
	最小值	0.7	−17.6	−21.3	−23.9	−0.4	−12.3	−47.1	−7.1	0.8	−19.7	33.5	6.8
	标准差	0.5	7.8	12.4	15.1	0.8	6.2	71.3	14.9	0.5	7.0	54.8	13.0
RCP8.5（远期）	平均值	5.2	6.0	−65.1	14.3	4.2	5.9	−0.3	9.8	5.2	2.5	208.2	47.1
	最大值	7.5	40.5	−28.2	120.4	7.7	39.1	77.8	64.7	7.4	27.3	260.0	78.0
	最小值	2.6	−24.7	−88.3	−37.3	−0.1	−19.4	−49.2	−17.4	2.5	−25.3	103.4	25.8
	标准差	1.2	12.6	15.0	29.1	1.9	10.4	37.8	16.4	1.2	10.9	32.5	11.8

注：平均值、最大值和最小值对应的正值表示增加，负值表示减少；表中的气温为绝对变化，降水、径流和冰融水均为相对变化。

2.4 预估结果的不确定性

流域水文模拟的不确定性主要来源于输入数据、水文模型结构和水文模型参数3个方面[54]。本研究已经利用历史观测水文资料和冰川变化数据对水文模型的模拟能力进行了相关评价，达到了满意的标准。而气候模式输出的未来气象数据作为水文模型的驱动因子，是预估流域水文过程结果不确定性的重要来源[55-57]。前人的研究表明多个气候模式集成均值和单个模式相比，能更好的反映出观测数据的变化趋势[22]。

本文集中39个气候模式，在年和月尺度上进行模拟预估，由不同气候模式给出的气温和降水输入水文模型引起流域模拟结果变化的全部变化范围。在年尺度上(图4)，冰川覆盖率越大的流域，预估径流不确定性变化区间受冰融水影响越大。而冰融水的不确定性区间总体表现为未来近期大于未来远期，在未来近期RCP2.6和RCP8.5这2个极端的情景下的不确定区间大于RCP4.5情景，且冰川覆盖率较大的流域冰融水不确定性区间较大。图6给出了39个气候模式输出的气象数据驱动水文模型预估流域未来近期和远期较历史时期年内径流变化的不确定性区间。预估的各流域夏季径流变化不确定性区间明显大于其它季节及年平均值(图6)，这主要与夏季冰融水发生明显变化有关(图5)。且不同冰川覆盖率的流域其不确定性区间有明显差异，冰川覆盖率越大，预估的夏季径流变化的不确定性区间在未来2个时期和不同情景下差异越大(图6)。且夏季39个气候模式预估径流变化的离散程度增加，可能导致极端水文事件也增加，尤其是在RCP8.5情景下各流域径流变化不确定性区间大

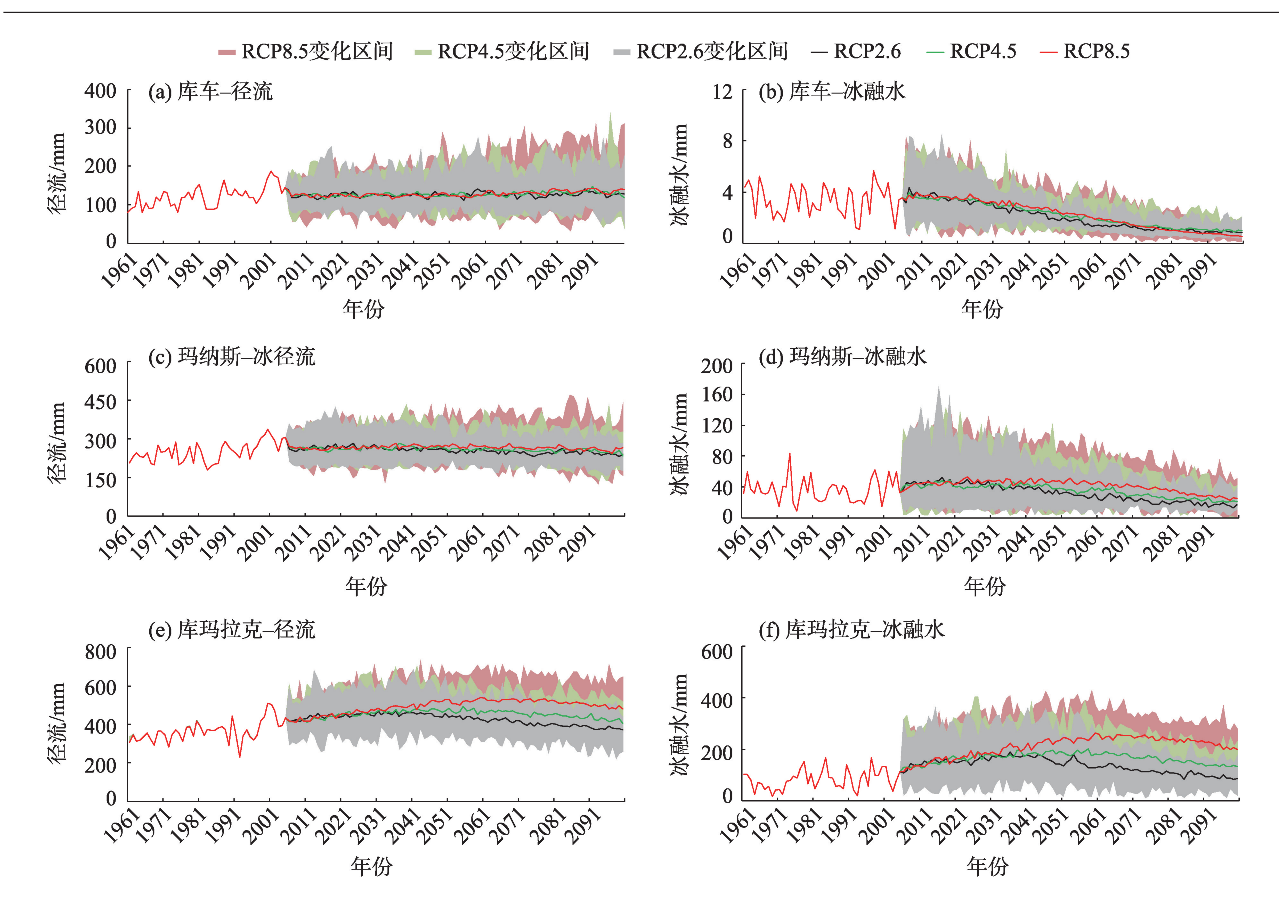
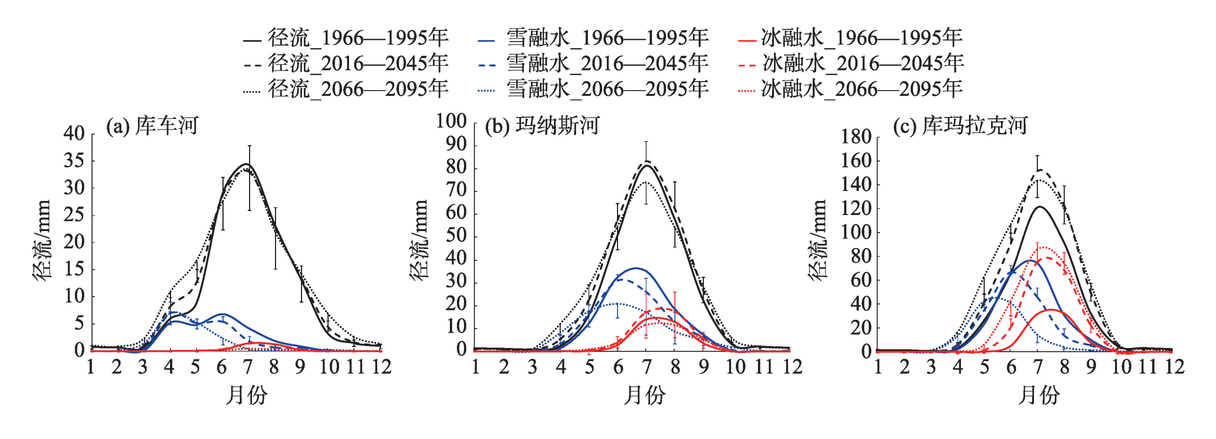


图4 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5情景下1961—2100年库车河、玛纳斯河、库玛拉克河径流和冰融水年际变化趋势

Fig. 4 Inter-annual change trends of streamflow and ice melt in Kuqa River, Manas River, and Kumaric River during 1961—2100 under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios



注：正误差棒代表2016—2045年39模式标准差，负误差棒代表2066—2095年39模式标准差。

图5 RCP8.5情景下库玛拉克河、玛纳斯河、库车河1966—1995年、2016—2045年、2066—2095年雪冰产流及径流年内分布

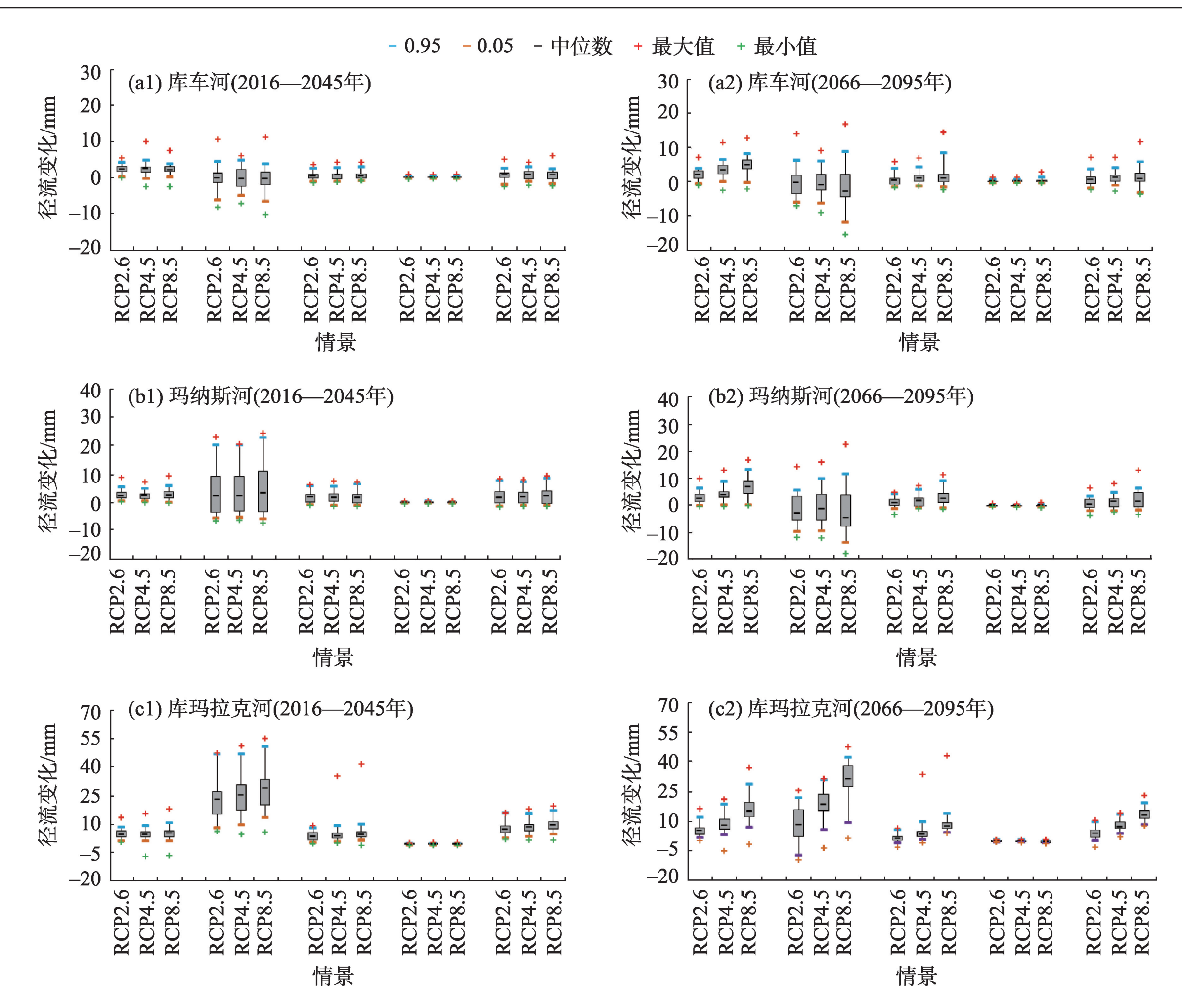
Fig. 5 Intra-annual distribution of snow melt, ice melt and stream flow in Kuqa River, Manas River and Kumaric River for the three periods of 1966—1995s, 2016—2045s, 2066—2095s under RCP8.5 scenario

于另外2个情景下的径流变化不确定性区间。

3 结 论

本文基于SWAT-RSG水文模型，将气候模式数据降尺度处理，驱动水文模型，在RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下，预估不同冰川覆盖率的流域未来雪冰融水及径流的变化，讨论径流对未来气候变化的响应及不确定性，得出以下结论：

（1）随着未来气温和降水增加，各流域的径流均呈增加趋势，但是不同冰川覆盖率的流域其径流



注：0.95表示预估的径流在95%分位上的变化值；0.05表示预估的径流在5%分位上的变化值。

图6 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5情景下39个气候模式驱动模型预估流域2016—2045年和2066—2095年较1996—1995年径流变化箱线图

Fig. 6 Boxes of runoff changes in the basin during 2016—2045 and 2066—2095 compared with 1996—1995 by the 39 climate model-driven models under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

的年内和年际变化在未来时期会发生较大的差别。尤其是在冰川覆盖率大的库玛拉克河流域径流主要受到雪冰融水变化影响，对气候变化响应更显著，随着排放情景增加径流量显著增加，在年内夏季径流量较历史时期也显著增加。冰川覆盖率很小的库车河流域，径流与降水变化趋势一致，在年内该河流夏季径流量则表现出减小的变化。

（2）39个气候模式集合驱动水文模型，集合平均值反映了绝大部分气候模式数据可能导致的未来水文过程的变化，波动区间则反映了该区域水文过程潜在的不确定性。冰川覆盖率越大的流域其径流预估的不确定性受冰融水影响越大，且在RCP2.6和RCP8.5极端排放情景下不确定性区间大于RCP4.5情景。在冰川覆盖率大的流域其径流不确定区间变化与冰融水变化一致，均表现为未来近期的不确定区间大于未来远期。对于冰川覆盖率很小的流域，径流变化的不确定性区间在未来2个时期逐渐增大，与该流域降水不确定性变化有关。

预估结果为39个气候模式集合，包含了绝大部分气候模式，减少了由单个或几个气候模式预估的气温和降水数据驱动水文模型带来的不确定性，但由于气候模式本身的不确定性，以及不同气候模式选取集合方式对预估结果也会产生不同程度的影响，应做进一步不确定性分析研究，提高未来气候变化对流域水文过程影响预估中的准确性。

参考文献（References）

[1] Vaughan G D, Comiso J C, Allison I, et al. Observation: Cryosphere

[C]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. New York, USA: Cambridge University Press, 2013: 317−382.

[2] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 全球冰川正在迅速消融[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(6): 440−442. [Zhao Zongci, Luo Yong, Huang Jianbin. Global glaciers are rapidly melting[J]. Advances in Climate Change Research, 2015, 11(6): 440−442.]

[3] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. Nature, 2005, 438(7066): 303−309.

[4] Unger-Shayesteh K, Vorogushyn S, Farinotti D, et al. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review[J]. Global and Planetary Change, 2013, 110: 4−25.

[5] Hagg W, Braun L N, Weber M, et al. Runoff modelling in glacierized Central Asian catchments for present-day and future climate [J]. Nordic Hydrology, 2006, 37(2): 93−105.

[6] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1−9. [Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1−9.]

[7] Schaner N, Voisin N, Nijssen B, et al. The contribution of glacier melt to streamflow[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(3): 34029−34036.

[8] 蒙彦聪, 李忠勤, 徐春海, 等. 中国西部冰川小冰期以来的变化——以天山乌鲁木齐河流域为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(3): 486−494. [Meng Yancong, Li Zhongqin, Xu Chunhai, et al. Glacier change of western China since the little ice age: A case of the Urumqi River Watershed[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(3): 486−494.]

[9] 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 38−46. [Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 38−46.]

[10] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan(Central Asia) [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725.

[11] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. 地理学报. 2006, 61(5): 482−490. [Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong, et al. Impact of the glacial change on water resources in the Tarim River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 482−490.]

[12] Khadka D, Babel M S, Shrestha S, et al. Climate change impact on glacier and snow melt and runoff in Tamakoshi Basin in the Hindu Kush Himalayan (HKH) region[J]. Journal of Hydrology. 2014, 511 (4): 49−60.

[13] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18−26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18−26.]

[14] Sorg A, Huss M, Rohrer M, et al. The days of plenty might soon be over in glacierized Central Asian catchments[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9: 10401810, doi: 10.1088/1748-9326/9/10/104018.

[15] Gan R, Luo Y, Zuo Q, et al. Effects of projected climate change on the glacier and runoff generation in the Naryn River Basin, Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 240−251.

[16] 张宜清. 气候变化对中国天山雨雪冰产流过程的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. [Zhang Yiqing. The impact of climate change on runoff generation and streamflow in the Tianshan Mountains, China[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]

[17] Lutz A F, Ter Maat H W, Biemans H, et al. Selecting representative climate models for climate change impact studies: An advanced envelope-based selection approach[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(12): 3988−4005.

[18] Woldemeskel F M, Sharma A, Sivakumar B, et al. A framework to quantify GCM uncertainties for use in impact assessment studies [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1453−1465.

[19] Immerzeel W W, van Beek L P H, Konz M, et al. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas[J]. Climatic Change, 2012, 110(3−4): 721−736.

[20] Zhang Y, Luo Y, Sun L, et al. Using glacier area ratio to quantify effects of melt water on runoff[J]. Journal of Hydrology, 2016, 538: 269−277.

[21] Ma C, Sun L, Liu S, et al. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River Basin, Central Asia[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(4): 501−513.

[22] Su F, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau [J]. Global and Planetary Change, 2016, 136: 82−95.

[23] Peel M C, Srikanthan R, Mcmahon T A, et al. Approximating uncertainty of annual runoff and reservoir yield using stochastic replicates of global climate model data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(4): 1615−1639.

[24] Bosshard T, Kotlarski S, Zappa M, et al. Hydrological climate-impact projections for the Rhine River: GCM-RCM uncertainty and separate temperature and precipitation effects[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(2): 697−713.

[25] Vetter T, Huang S, Aich V, et al. Multi-model climate impact assessment and intercomparison for three large-scale river basins on three continents[J]. Earth System Dynamics, 2015, 6(1): 17−43.

[26] Xu H, Taylor R G, Xu Y. Quantifying uncertainty in the impacts of climate change on river discharge in sub-catchments of the Yangtze and Yellow River Basins, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 333−344.

[27] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate

change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328 (5984): 1382-1385.

[28] 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 562-568. [Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao, et al. Runoff changes in Aksu River Basin during 1956—2006 and their impacts on water availability for Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 562-568.]

[29] 沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 1957—2006年天山萨雷扎兹库玛拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 792-800. [Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, et al. Changes in glacier mass balance in eatershed of Sary Jaz-Kumarik Rivers of Tianshan Mountains in 1957—2006 and their impact on water resources and trend to end of the 21th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31 (5): 792-800.]

[30] 叶柏生, 丁永建, 刘潮海. 不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 103-110. [Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Chaohai. Response of valley glaciers in various size and their runoff to climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 103-110.]

[31] 高前兆, 王润, Ernst Giese. 气候变化对塔里木河来自天山的地表径流影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 1-11. [Gao Qianzhao, Wang Run, Ernst Giese. Impact of climate change on surface runoff of Tarim River originating from the south slopes of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 1-11.]

[32] Luo Y, Arnold J, Liu S, et al. Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains, northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 477: 72-85.

[33] Aizen V B, Aizen E M, Melack J M, et al. Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia[J]. Journal of Climate, 1997, 10(6): 1393-1404.

[34] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61 (226): 357-372.

[35] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B, et al. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data[J]. Global and Planetary Change, 2007, 56(3-4): 328-340.

[36] Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, et al. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(9): 1401-1415.

[37] Sheffield J, Goteti G, Wood E F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling[J]. Journal of Climate, 2006, 19(13): 3088-3111.

[38] Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in high Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 587-592.

[39] 李兰海,尚明,张敏生,等. APHRODITE降水数据驱动的融雪径流模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 53-59. [Li Lanhai, Shang Ming, Zhang Minsheng, et al. Snowmelt runoff simulation driven by APHRODITE precipitation dataset[J]. Advances in Water Science, 2014, 25: 53-59.]

[40] Lutz A F, Immerzeel W W, Gobiet A, et al. Comparison of climate change signals in CMIP3 and CMIP5 multi-model ensembles and implications for Central Asian glaciers[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(9): 3661-3677.

[41] Wang X, Sun L, Zhang Y, et al. Rationalization of altitudinal precipitation profiles in a data-scarce glacierized watershed simulation in the Karakoram[J]. Water, 2016, 8(5): 186.

[42] 王晓蕾, 孙林, 张宜清, 等. 用分布式水文模型识别流域冰川融水对径流的贡献——以天山库玛拉克河为例[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 475-484. [Wang Xiaolei, Sun Lin, Zhang Yiqing, et al. Estimation of glacier melt contribution to streamflow using a distributed hydrologic model for the Kumaric River, Tien Shan[J]. Resources Science, 2015, 37(3): 475-484.]

[43] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142(1-4): 47-69.

[44] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

[45] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transaction of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.

[46] Masson D, Knutti R. Spatial-scale dependence of climate model performance in the CMIP3 ensemble[J]. Journal of Climate, 2009, 24(11): 2680-2692.

[47] Wilby R L, Charles S P, Zorita E, et al. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods[J]. Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA, 2004, 24(27): 119-120.

[48] Arnell N W. Climate change and water resources in Britain[J]. Climate Change, 1998, 39(1): 83-110.

[49] 刘潮海, 施雅风, 王宗太, 等. 中国冰川资源及其分布特征——中国冰川目录编制完成[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 106-112. [Liu Chaohai, Shi Yafeng, Wang Zongtai, et al. Glacier resources and their distributive characteristics in China: A review on Chinese glacier inventory[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 2000, 22(2): 106-112.]

[50] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19. [Zhang Yanwu, Zhang Li, Xu Ying. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models[J]. Advances in Cli-

mate Change Research, 2016, 12(1): 10−19.]

[51] Tianjun Z, Fengfei S, Xiaolong C. Historical evolution of global and regional surface air temperature simulated by FGOALS-s2 and FGOALS-g2: How reliable are the model results[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(3): 638−657.

[52] Kong Y, Pang Z. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge[J]. Journal of Hydrology, 2012, 434−435: 121−129.

[53] Kaldybayev A, Chen Y, Issanova G, et al. Runoff response to the glacier shrinkage in the Karatal River Basin, Kazakhstan[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3): 208.

[54] Semenova O, Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modelling[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(8): 2074−2078.

[55] Kay A L, Davies H N, Bell V A, et al. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: Flood frequency in England [J]. Climatic Change, 2009, 92(1): 41−63.

[56] Haque M M, Rahman A, Hagare D, et al. Estimation of catchment yield and associated uncertainties due to climate change in a mountainous catchment in Australia[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(19): 4339−4349.

[57] Luo Y, Wang X, Piao S, et al. Contrasting streamflow regimes induced by melting glaciers across the Tien Shan-Pamir-north Karakoram[J]. Sentific Report, 2018, 8: 16470, doi: 10.1038/s41598-018-34829-2.

Predicting climate change and its impact on runoff in snow-ice basin with multi-climate models

RAN Sihong[1,2], WANG Xiaolei[2,3], LUO Yi[2,3]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The snow-ice melt water in glacier-covered basins plays an essential role in regulating runoff. The impact of climate change on the snow-ice melting process and quantity change, river runoff process and quantity change, which is related to the glacier area in the basin. Using climate models' meteorological data of CMIP5 driven watershed hydrological model, simulated runoff response to climate change in Tianshan areas (Kumaric River, Manas River, and Kuqa River, Xinjiang, China). The results show that with the temperature and precipitation increasing in the future, three river basins' snow melt water is both increasing, but ice melt water changes affected by glacier coverage. The change of runoff was mainly affected by the increase in precipitation and the change in snow and ice melt water; the runoff increased by 5.8%−14.3% (Kuqa River), 2.9%−11.4% (Manas River), and 12.9%−47.1% (Kumaric River) under three representative concentration pathways (RCPs). It was estimated that the variation range of runoff uncertainty was affected by ice melting. From the projected intra-annual distribution of runoff, the snow and ice melt of the three basins, the spring runoff of the river basins increased compared with the historical period due to the snow melt time ahead and snow melt volume. In the summer, the peak runoff of the Kuqa River and Manas River decreased due to ice melt water, whereas the peak value of runoff in Kumaric River increased. In addition, the estimated uncertainty range of summer runoff in the study basins in the summer season is significantly larger than those of other seasons.

Key words: climate change; climate model; hydrological model; glacier; runoff